

COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODOLOGIES ET REFERENTIELS POUR ESTIMER L'INCERTITUDE DE PESEE

L. Domenech
CT2M

Centre des Creusets, route de Lançon, 13 250 Saint Chamass

Résumé

Pour estimer leur incertitude de pesée, les laboratoires accrédités peuvent utiliser différentes méthodologies :

- Ils peuvent calculer l'incertitude de pesée à partir d'EMT définies en fonction du besoin de l'utilisateur.

- Ils peuvent est d'exploiter l'incertitude de l'instrument de pesage fournie dans le certificat d'étalonnage. Les prestataires d'étalonnage accrédités peuvent se baser sur 2 documents : le document n°2089 édité par le Cofrac ou le document CG18 édité par l'EURAMET (septembre 2010).

L'objectif de cet article est de décrire la méthodologie proposée par ces 2 référentiels, de clarifier le contenu de chacune des incertitudes calculées afin qu'elles soient mieux exploitées par les utilisateurs.

Summary

To estimate their weighing uncertainties, accredited laboratories can use different methods :

- They can calculate the weighing uncertainty taking into account the Maximum Permissive Error (mpe) corresponding to the need of the user.

- They can exploit the uncertainty given in the calibration certificate. The accredited calibration laboratories have 2 different referential to estimate these uncertainties: the 2089 document from the COFRAC and the CG18 document from the EURAMET.

The goal of this abstract is to describe the methodology proposed by the 2 referential, clarify the contain of the different standard uncertainties in order to help the user better exploit these data's.

Contexte

Un laboratoire souhaitant estimer son incertitude de pesée doit, préalablement caractériser son instrument de pesage ou le faire caractériser.

Cette opération, souvent appelée étalonnage, comporte 3 principaux essais :

- un essai de justesse
- un essai de fidélité
- un essai d'excentration

L'étalonnage, à proprement parlé, n'est réellement que le premier essai cité, puisqu'il consiste en la comparaison des indications de l'instrument de pesée avec les valeurs de l'étalon utilisé.

Si le laboratoire réalise lui-même son étalonnage, il pourra s'appuyer sur les documents de référence existants pour définir la méthodologie et estimer l'incertitude associée à l'erreur d'indication de l'instrument. Les documents qui sont à sa disposition sont :

- la norme NF EN 45 501,
- le document COFRAC n°2089
- le Guide EURAMET CG18.

Si le laboratoire fait réaliser la prestation d'étalonnage par un laboratoire accrédité, ce dernier exploitera, dans la majorité des cas, les données d'étalonnage selon un des deux derniers documents. Les laboratoires accrédités par le COFRAC en France s'appuient majoritairement sur le Document n°2089. Par contre, si l'on fait appel à un prestataire accrédité par un organisme d'un autre pays (DKD par exemple), la méthodologie choisie peut être celle du document EURAMET.

L'utilisateur se trouve alors devant les difficultés suivantes :

- comment exploiter les données fournies par le prestataire d'étalonnage dans les documents
- à quoi correspondent les différentes incertitudes données ?
- que prennent-elles en compte ?
- comment s'en servir pour estimer son incertitude de pesée ?

Méthodologie générale

Quelle que soit la méthode d'estimation de l'incertitude de choisie, les étapes pour y parvenir sont identiques :

Etape 1 : caractériser périodiquement l'instrument de pesage (justesse, fidélité, excentration)

- l'essai de justesse permet de calculer les erreurs d'indication (erreur de justesse) de la balance aux différents points de la plage de mesure
- l'essai de fidélité permet de caractériser la variabilité du processus de mesure dans des conditions de répétabilité : cet essai peut être réalisé à une ou plusieurs charges.
- L'essai d'excentration permet de définir les erreurs liées à l'excentration de la charge lors d'une pesée.

Étape 2 : Calculer les erreurs d'indication (E_i) et leurs incertitudes associées ($U(E_i)$)

Étape 3 : Estimer l'incertitude de pesée à partir des données d'étalonnage et des conditions opérationnelles de pesage. Pour cela, on pourra :

- soit définir des EMT et déclarer la conformité de la balance à ces EMT. L'incertitude de pesée sera alors liée à ces EMT
- soit exploiter les données du certificat d'étalonnage.

1^{ère} méthodologie : définir une EMT

En fonction de l'usage que l'on souhaite faire de la balance, l'utilisateur doit pouvoir définir des Erreurs Maximales Tolérées (EMT).

À l'issue de l'étalonnage, l'utilisateur pourra alors effectuer une vérification de l'instrument de pesage et déclarer la conformité ou non aux EMT précédemment déterminées.

La vérification consiste alors à vérifier que l'erreur d'indication (E_i) associée à son incertitude ($U(E_i)$) est inférieure ou égale à cette EMT.

Dans ce cas, on pourra conclure que la balance est conforme pour l'utilisation que l'on souhaite en faire et on pourra affirmer avec une probabilité importante (95 %) que les pesées ne seront pas entachées d'une erreur systématique de plus de l'EMT.

L'incertitude de pesée prendra donc en compte cette EMT pour le calcul de l'incertitude liée à la justesse de l'instrument. Les données de répétabilité et d'excentration seront également utilisées dans le calcul d'incertitude de pesée.

Cette méthode a l'avantage :

- de déclarer la conformité de l'instrument par rapport à un besoin préétabli
- de permettre l'évaluation d'une incertitude de pesée qui n'est pas dépendante des données d'étalonnage, tant que l'instrument reste conforme à ces EMT

Par contre, cela nécessite d'être capable de définir son besoin en amont.

2^{nde} méthodologie : Exploiter les données du certificat d'étalonnage

Si l'utilisateur choisit d'exploiter les données du certificat, il n'aura alors plus besoin de passer par la définition d'une EMT.

En effet, le prestataire d'étalonnage fourni, dans son certificat d'étalonnage, une incertitude liée à l'instrument de pesage appelée :

- Incertitude de l'instrument de pesage $U(IP)$ dans le cas du document Cofrac n°2089
- Incertitude de lecture $U(R)$ dans le cas du document Euramet CG18

Cette incertitude ne doit pas être confondue avec l'incertitude de pesée car elle ne prend en compte qu'une partie des paramètres d'influence. De plus, il nécessite de connaître les hypothèses de base afin de ne pas arriver à une évaluation erronée de l'incertitude de pesée.

Dans la suite de ce document, nous allons détailler les différentes méthodologies proposées et préciser les hypothèses.

Incertitude sur l'erreur d'indication $U(E_i)$

Le tableau suivant répertorie les paramètres d'influence pris en compte dans l'estimation de l'incertitude sur l'erreur d'indication ($U(E_i)$) dans chacun des guides :

Facteur d'influence	Doc 2089	Doc CG18
Incertitude liée à l'indication (valeur lue sur balance)		
Répétabilité de l'étalonnage	X	X
Résolution à vide de la balance	X	X
Résolution en charge de la balance	X	X
Excentration	Généralement négligé	
Incertitude liée à la valeur de référence		
Valeur de référence des étalons	X	X
Pérennité des étalons (dérive) *	X	X
Variations de poussée de l'air (liées aux variations de masse volumique de l'air) *		X
Température *	X	X

Les paramètres d'influence pris en compte dans chacun des guides sont sensiblement identiques. Les facteurs d'influence identifiés avec un * sont ceux dont la méthodologie diffère et pour lesquels je développerais la méthode employée

Pérennité : les 2 guides distinguent le cas où :

- la valeur conventionnelle des étalons est prise en compte pour le calcul de l'erreur d'indication
- la valeur nominale des étalons est prise en compte dans le calcul de l'erreur d'indication

Si la valeur conventionnelle est utilisée :

- Guide n°2089 : Incertitude de pérennité au moins égale à l'incertitude type d'étalonnage
- Guide CG18: Incertitude de pérennité comprise entre 1 et 3 fois l'incertitude type d'étalonnage

Si la valeur nominale est utilisée, les méthodologies sont différentes :

- Guide n°2089 : Pas d'incertitude de pérennité car dérive prise en compte dans l'EMT
- Guide CG18: Incertitude de pérennité = $EMT_{\text{poids}}/\sqrt{3}$ (loi uniforme d'étendue 2 EMT)

Cette différence est significative puisque, dans le cas du Guide CG18, on double une incertitude type qui a un « poids » significatif dans l'incertitude finale.

D'autant plus qu'il peut paraître peu judicieux de prendre en compte une incertitude de dérive sur un poids classé.

Variation de poussée de l'air :

- Guide n° 2089 : les effets de poussée de l'air sont négligés dans le cadre de ce guide.
- Guide CG18 : ce guide aborde les problèmes de poussée de l'air et distingue différents cas :
 - o Ajustage réalisé immédiatement avant étalonnage
 - o L'ajustage n'a pas été réalisé avant étalonnage (on ne connaît pas les conditions de masse volumique de l'air lors de l'ajustage)

L'incertitude associée est liée au fait que la valeur conventionnelle de l'étalon est valable dans des conditions conventionnelles de poussée de l'air (c'est-à-dire dans un air de masse volumique 1,2 kg/m³ et avec des poids étalons de 8000 kg/m³). Si ces conditions ne sont pas strictement respectées, on aura effectivement une variation de la masse apparente de l'étalon.

Dans le cas de l'hypothèse la plus défavorable (ajustage non réalisé avant étalonnage de la balance), l'incertitude associée est non négligeable.

Température :

- Selon le guide n°2089, les variations de température durant l'étalonnage agissent sur la réponse de la balance. Elle dépend du coefficient de sensibilité de la balance et est proportionnelle à la masse pesée.
- le Guide CG18 prend en compte des effets de convections liés à une différence de température entre les poids étalon et la température ambiante. Cet effet peut être réduit en prenant soin d'acclimater les poids avant utilisation. Pour

autant, des variations de température pendant l'étalonnage peuvent générer ces effets.

Le guide précise que cet effet est souvent négligeable au regard des autres sources d'incertitude et des besoins des utilisateurs.

Exemple

Un exemple sur une balance de portée maximale 200g et de résolution 0,1 mg est donnée en annexe.

Les résultats montrent que :

- les deux méthodologies donnent des résultats similaires dans le cas d'un ajustage immédiat avant étalonnage
- l'incertitude sur l'erreur d'indication augmente de façon très importante si un ajustage n'est pas effectué systématiquement avant étalonnage. L'incertitude prépondérante est l'incertitude liée à la poussée de l'air.

Incertitude de mesure

Le tableau suivant répertorie les paramètres d'influence pris en compte dans l'estimation de l'incertitude sur l'instrument de pesage (U(IP)) dans le cas du document Cofrac n°2089 et du résultat de pesée (U(W)) dans chacun des guides :

Facteur d'influence	Doc 2089	Doc CG18
Incertitude liée à l'indication (valeur lue sur balance)		
Répétabilité de l'étalonnage	X	X
Erreurs d'indication *	X	X
Résolution à vide de la balance	X	X
Résolution en charge de la balance	X	X
Excentration *	X	X
Incertitude liée à l'environnement		
Variations de masse volumique de l'air	X	
Température	X	X

Les paramètres d'influence pris en compte dans chacun des guides sont sensiblement identiques. Les facteurs d'influence identifiés avec un * sont ceux dont la méthodologie diffère et pour lesquels je développerais la méthode employée

Erreur d'indication :

- dans le Guide n°2089, l'incertitude liée aux erreurs d'indication est calculée à partir de l'incertitude maximale relative sur les erreurs d'indication et l'erreur d'indication relative maximale
- dans le Guide CG18, il y a deux composantes liées à l'erreur d'indication :
 - o l'incertitude sur l'erreur d'indication issue de l'étalonnage

- o la non correction de l'erreur d'indication en ajoutant cette erreur en arithmétique puisque les erreurs d'indication ne sont pas corrigées.

Cela est bien en accord avec les préconisations du GUM.

Excentration : dans les 2 cas, l'excentration a été estimée à une seule valeur de pesée

- dans Guide n°2089, l'incertitude sur l'excentration est la même sur toute la plage de pesée
- le guide CG18 fait l'hypothèse d'une incertitude liée à l'excentration proportionnelle à la masse pesée.

Exemple

Le traitement de l'exemple a été poursuivi.

Les résultats montrent que :

- les deux méthodologies donnent des résultats finaux assez cohérents
- cependant les hypothèses de bases sont assez différentes.

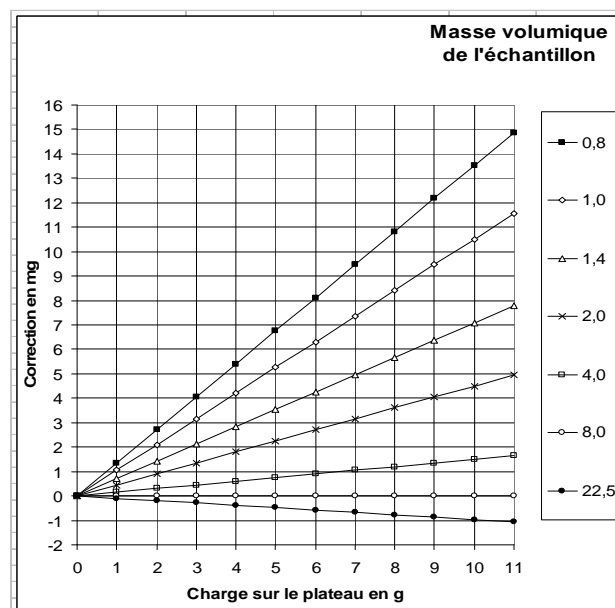
Conclusion

Malgré la différence de méthodologie adoptée les résultats finaux sur l'incertitude de mesure sont cohérents.

Par contre, la méthodologie proposée par le guide CG18 montre des résultats sensiblement différents selon que l'instrument a été ajusté ou non avant étalonnage. Cette condition de mesure est donc importante à préciser dans le cadre de la sous-traitance de la prestation.

De plus, il est également important de garder à l'esprit que cette incertitude ne représente que l'incertitude liée à l'instrument de pesage et aux conditions de mesure. Elle ne prend pas en compte les facteurs d'influence liés aux caractéristiques de l'objet pesé. Or, la masse volumique de l'objet pesé sera d'autant plus influente qu'elle est différente de la masse volumique des étalons.

En omettant ce facteur d'influence, on risque de fortement sous-estimer l'incertitude finale.



Le graphique ci-contre montre que la correction de poussée de l'air est proportionnelle à la masse pesée et d'autant plus importante que la masse volumique de l'objet est faible.

Par exemple, la pesée de 10g de solution aqueuse (de masse volumique proche de 1000 kg/m³) génère une poussée de l'air de 10 mg, soit une erreur de 0,1 %.

En comparaison avec l'incertitude calculée selon les 2 guides (de l'ordre de 0,02 % environ), l'erreur liée à la non correction de poussée de l'air est 5 fois plus importante.

Pour conclure, les incertitudes proposées dans les certificat d'étalonnage peuvent être exploitées si le laboratoire souhaite estimer son incertitude de pesée.

Pour autant, il faudra :

- vérifier que les hypothèses de conditions de fonctionnement prises par le prestataire d'étalonnage pour l'estimation de l'incertitude sur la mesure correspondent bien aux conditions d'utilisation de l'utilisateur
- prendre en compte les facteurs d'influence liés aux caractéristiques de l'objet pesé

Références

[1] Cofrac, Document n°2089 rev0, exigences spécifiques relatives à l'étalonnage d'instruments de pesage à fonctionnement non automatique, octobre 2000

[2] Euramet, CG18, Guideline on the calibration of Non-automatic Weighing Instruments, Septembre 2010.

Incertitude sur l'erreur d'indication :

Instrument :

Portée max	200 g	Ecart type de répétabilité	0,2 mg	
Résolution	0,1 mg			
Calibration interne	oui	EMT Poids étalons (E2)		
Variation de température pendant l'étalonnage	1 °C	50 g	0,1 mg	
Facteur de sensibilité	$1,5 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$	100 g	0,15 mg	
Variation de température en utilisation	1 °C	150 g (100 + 50)	0,25 mg	
		200 g	0,30 mg	

Cas 1 : ajustage immédiat avant étalonnage

Cas 2 : pas d'ajustage systématique avant étalonnage

		50		100		150		200	
		Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18
Incertitude sur la valeur lue :									
répétabilité (mg)		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
résolution vide (mg)		0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029
résolution charge (mg)		0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029
excentration (mg)		négligée	négligée	négligée	négligée	négligée	négligée	négligée	négligée
Incertitude sur la valeur de référence :									
incertitude masse de ref (mg)		0,050	0,058	0,075	0,087	0,125	0,144	0,150	0,173
pérennité étalon (mg)			0,058		0,087		0,144		0,173
poussée de l'air (mg)	Cas 1		0,014		0,022		0,036		0,043
	Cas 2		0,447		0,888		1,335		1,775
température (mg)		0,043	0,017	0,087	0,029	0,130	0,038	0,173	0,046
u(Ei) (mg)	Cas 1	0,218	0,221	0,238	0,241	0,275	0,293	0,310	0,325
	Cas 2		0,499		0,919		1,366		1,804
U(Ei) (k=2) (mg)	Cas 1	0,4368447	0,442	0,4752192	0,482	0,5507571	0,587	0,6191392	0,650
	Cas 2		0,998		1,839		2,733		3,609
U(Ei) relative (%)	Cas 1	0,00087%	0,00088%	0,00048%	0,00048%	0,00037%	0,00039%	0,00031%	0,00033%
	Cas 2		0,00200%		0,00184%		0,00182%		0,00180%

Incertitude sur la mesure de pesée :

		50		100		150		200	
		Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18	Doc 2089	CG18
Incertitude sur l'indication :									
répétabilité		0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
résolution vide		0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029
résolution charge		0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029	0,041	0,029
Erreur d'indication	Cas 1	0,1502	0,221	0,3003	0,241	0,4505	0,293	0,6006	0,325
	Cas 2		0,499		0,919		1,366		1,804
Pérennité des Ei		0,437		0,874		1,311		1,747	
Excentration		0,163	0,115	0,163	0,231	0,163	0,346	0,163	0,462
Incertitude liée à l'environnement :									
température		0,043	0,043	0,087	0,087	0,130	0,130	0,173	0,173
poussée de l'air		0,180		0,361		0,541		0,722	
u(IP ou W) (mg)	Cas 1	0,542	0,325	0,982	0,401	1,442	0,514	1,909	0,625
	Cas 2		0,553		0,974		1,430		1,882
U(IP ou W) (k=2) (mg)	Cas 1	1,0833013	0,850	1,9632032	1,101	2,8847660	1,829	3,8179401	2,450
	Cas 2		1,306		2,247		3,661		4,963
U(IP ou W) relative (%)	Cas 1	0,0022%	0,0017%	0,0020%	0,0011%	0,0019%	0,0012%	0,0019%	0,0012%
	Cas 2		0,0026%		0,0022%		0,0024%		0,0025%